

УДК 621.777.01

DOI: 10.15587/1729-4061.2017.59418

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОЦІНКИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗАГОТОВОК З ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Р. Д. Іскович-Лотоцький

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри*

E-mail: islord@vntu.edu.ua

О. В. Зелінська

Кандидат технічних наук, старший викладач

Кафедра моделювання та інформаційних
технологій в економіці**

E-mail: zeloksanavlad@gmail.com

Я. В. Іванчук

Кандидат технічних наук, доцент*

E-mail: ivanchuck@ukr.net

Н. Р. Веселовська

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри

Кафедра машин та обладнання
сільськогосподарського виробництва**

E-mail: wnatalia@mail.ru

*Кафедра галузевого машинобудування

Вінницький національний технічний університет

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021

**Вінницький національний аграрний університет

вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008

Розглянуто системний підхід до технологічного процесу формоутворення (процес, машина, заготовка), що дозволило розробити математичну модель оцінки. На основі математичної моделі нечітких множин була виконана оцінка ефективності функціонування технологічного комплексу. Визначені зв'язки між параметрами підсистем на базі вібропресового обладнання з гідроімпульсним приводом для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів

Ключові слова: нечіткі множини, формоутворення, рівнощільність, гідроімпульсний привод, вібропресове обладнання, порошковий матеріал

Рассмотрен системный подход к технологическому процессу формообразования (процесс, машина, заготовка), что позволило разработать математическую модель оценки. На основе модели нечетких множеств была выполнена оценка эффективности функционирования технологического комплекса. Определены связи между параметрами подсистем на базе вибропресового оборудования с гидромпульсным приводом для формообразования заготовок из порошковых материалов

Ключевые слова: нечеткие множества, формообразование, равноуплотненность, гидромпульсный привод, вибропресовое оборудование, порошковый материал

1. Вступ

Технології, які характеризуються процесами формоутворення заготовок, в яких реалізується текучість матеріалів із складною реологією в умовах складного навантаження, потребують нових розробок, вивчення та вдосконалення. Широке використання знаходять вібраційні та віброударні технологічні процеси, а також обладнання для їх реалізації [1–3]. Встановлено, що прикладання до об'єктів обробки корисних вібрацій або ударних імпульсів дозволяє значно інтенсифікувати протікання ряду технологічних процесів, забезпечити оптимальність параметрів навантаження і одержати виріб з високими якісними параметрами. Зокрема, при пресуванні заготовок виробі з порошкових матеріалів (карбідів, боридів тощо) середня щільність і рівнощільність по об'єму заготовок збільшується на 60–70 % в умовах безвідходного виробництва. Тому до вібраційного обладнання

для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів висуваються підвищені вимоги. Воно повинно мати порівняно просту конструкцію, високу надійність, низькі металоємність і енергоємність та забезпечувати якість формованого виробу.

Тому розробка ефективного методу оцінювання стану технологічного комплексу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні є актуальною задачею.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

При розробці процесів формоутворення заготовок з неметалевих порошкових матеріалів [4, 5], авторами в роботі [4] не був проаналізований найбільш ефективний спосіб формоутворення – віброударне пресування [1–3]. В роботі [5] автор не відмітив наявності високої степені

нерівнощільності заготовок при формоутворенні в центрифугах. До технологічного обладнання з гідроімпульсним приводом [6, 7] пред'являються головні вимоги, такі, як надійність і ефективність. Представлене авторами [6] оригінальне технологічне обладнання, за своєю складністю, вимагає наявності перспективних методів технічної оцінки. Вони полягають в знаходженні на усіх стадіях робочих параметрів стану технологічного обладнання. Також роботі [7] автори не зазначили багатостадійності технологічного процесу. Це призводить до значної невизначеності стану системи в цілому. Тому використання методу нечітких множин забезпечить ефективне попередження або припинення їхнього подальшого можливого негативного розвитку [1–3].

На даний час знаходиться широке застосування математичне моделювання фізичних процесів на основі нечітких множин [8, 9]. Причому, автори в роботі [8] звузили використання даного методу тільки в області енергетики. В роботі [9] автор вказав на наявність стохастичних процесів в гідрології, що унеможливорює застосування методу нечітких множин для дослідження технологічних процесів машин обробки тиском. Даним методом можна глибоко і повно досліджувати вплив конструктивних і режимних факторів на основні характеристики технологічного процесу формоутворення заготовок на вібропресовому обладнанні із гідроімпульсним приводом. Метод оцінки нечіткими множинами дозволяє намітити конкретні шляхи їх покращення, істотно знизивши при цьому об'єми експериментальних досліджень [10, 11]. Незважаючи на складність розрахунків математичного опису технології комплексної оцінки ефективності інновацій [10], автори із-за розгляду тільки початкового етапу не повністю висвітлили можливості даного методу. Причому, в роботі [11] автори не дослідили вплив конструктивних і режимних факторів на стійкість поставок в ланцюгу поставок в металургійній промисловості. Хоча вплив конструктивних і режимних факторів на ефективність формоутворення заготовок на вібропресовому обладнанні із гідроімпульсним приводом [1, 3] під час експерименту можуть бути уточнені [8–11].

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності технологічних процесів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів, за допомогою розробки перспективних математичних моделей вібропресового обладнання з гідроімпульсним приводом.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- проаналізувати процес формоутворення заготовок з порошкових матеріалів за допомогою вібраційної і віброударної обробки на основі розробленої структури вібропресових формувальних машин, типів приводів та їх характеристик;
- розробити модель, складання й обґрунтування множин вхідних і вихідних параметрів для оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу;
- на основі розробленої моделі нечітких множин отримати залежності для кількісних характеристик досліджуваного процесу, за допомогою яких вибрати ефективний режим віброударного пресування.

4. Матеріали та методи дослідження технологічних параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів

4. 1. Об'єкт дослідження

Технологічний процес виготовлення виробів з нових високоефективних матеріалів [1, 3, 12] на основі порошків металів і неметалів, їх сплавів та з'єднань з наповнювачами, можна уявити послідовно виконуваними операціями підготовки шихти (порошкового матеріалу), формоутворення заготовок та їх термообробки. Основною технологічною операцією є формоутворення заготовок, яке може здійснюватися такими методами, як: вільне насипання у форму, лиття суспензій і паст, ущільнення утрамбуванням і рядом їх комбінацій. Найпоширеніше формоутворення заготовок методом пресування, реалізується різними способами простим, східчастим, ізостатичним, мундштуковим, імпульсним, ударним, вібраційним і віброударним [1, 2, 12].

У порівнянні з іншими способами пресування, вібраційне та віброударне пресування (ВУП) забезпечує виконання технічних вимог до заготовки більш економічно. Останнє пояснюється значним зниженням робочого зусилля у порівнянні із зусиллям статичного пресування, що призводить до зменшення зносу деталей прес-форм. Також це забезпечує можливість виготовлення заготовок з виробів складної конфігурації, великих габаритів і тонкої стінки. Їх виробництво раніше було утруднено або практично неможливо.

Для реалізації ВУП пресування порошкових матеріалів застосовується спеціальне обладнання. Це обумовлено різними варіантами рекомендованих схем навантаження заготовки при обробці, і різноманіттям типів приводів механізмів генерування вібрацій, чи вібробуджувачів. Перспективним є застосування інерційних вібропрес-молотів (ІВПМ) з гідроімпульсним приводом (ГІП), що обумовлене простою конструкції, компактністю, високою енергоємністю, широким діапазоном регулювання робочих параметрів та можливістю роботи в автоматизованому режимі.

У Вінницькому національному технічному університеті на замовлення Броварського заводу порошкової металургії (Україна) був створений новий тип гідравлічних ІВПМ [13] (рис. 1). Новий тип обладнання враховує усі вимоги, що висуваються до способу формоутворення заготовок з карбідокремнієвих порошкових матеріалів.

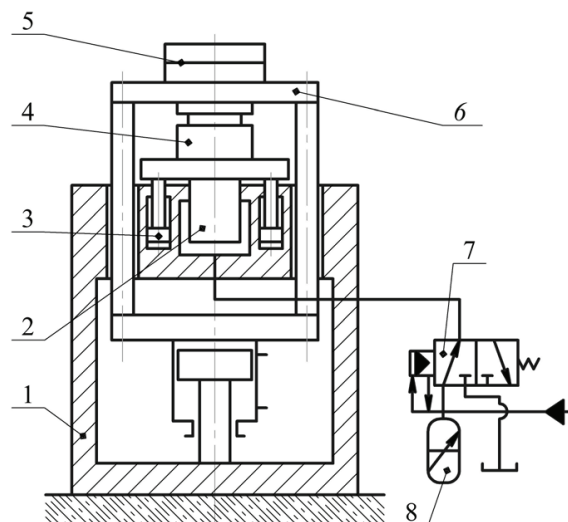


Рис. 1. Конструктивна схема інерційного вібропрес-молота

Особливість даної машини – наявність рухомої траверси 6 із змінним інерційним вантажем 5, що інтенсифікує процес ущільнення заготовки 4. В осьовій розточці станини 1 розміщений плунжер 2 виконавчої ланки, зв'язаного зі станиною 1 елементами пружного повернення 3. Направляючі колони 9 рухомої траверси 6 пропущені в розточку станини 1, а на нижній поперечині 10 закріплений циліндр 11 установочних переміщень. В залежності від вимог технології на машині, створений по такій схемі, можна забезпечити вібраційний або віброударний режим пресування порошкових матеріалів. Режими пресування визначаються умовами взаємодії рухомих елементів самої машини, а також способом підключення і налагодження клапана-пульсатора 7 і гідроаккумулятора 8 ГПП.

4. 2. Постановка задачі дослідження

В досліджуваному технологічному комплексі для віброударного пресування ми можемо виділити три основні взаємопов'язані системи: об'єкт обробки (система I), робочий процес (система II) і машина (система III), які об'єднуються в загальну систему технологічного комплексу [1] (рис. 2).

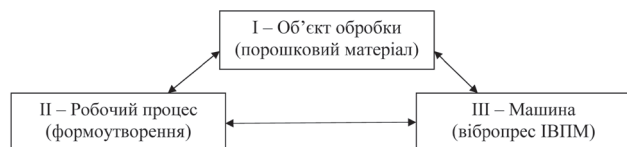


Рис. 2. Схема технологічного комплексу віброударного пресування

У випадку з ІВПМ об'єктом обробки є порошковий матеріал, який проявляє властивості метасистеми. Для останньої визначення проміжних станів в часі є складною і не завжди здійсненою задачею. Тому систему I необхідно подати у вигляді двох підсистем I.1 та I.2, що характеризують, відповідно, початковий (навішування порошкового матеріалу) та кінцевий (заготовка виробу) стани об'єкта обробки (рис. 3).

Система II функціонально залежить від системи I і являє собою технологічний процес пресування. Даний процес описується двома підсистемами II.1 та II.2, що встановлюють спосіб ВУП та прийнятий основний режим його реалізації (рис. 4).

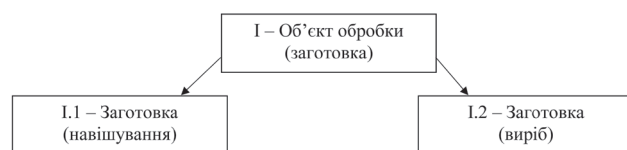


Рис. 3. Структурна схема системи I – заготовка

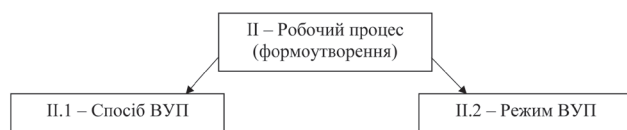


Рис. 4. Структурна схема системи II – робочий процес (формоутворення)

Вибір системи III визначають системи I та II. Системою III є ІВПМ, який ділиться на підсистеми ГПП (III.1),

рухомих ланок (III.2), вібробудувача (III.3) і прес-форми (III.4). Згідно з системним підходом кожна з виділених підсистем може бути поділена на ланки. Оскільки при створенні власне ІВПМ задачі проектування ГПП та його вібробудувача розв'язуються лише у загальному вигляді, а прес-форма складається з двох основних деталей – матриці і пунсона, на блок-схемі достатньо вказати лише підсистему III.2, яка містить станину з фундаментом (ланка III.2.1), вібростіл (основна робоча ланка III.2.2) і допоміжну робочу ланку III.2.3. При цьому кожна з вказаних ланок за необхідності розділяється на деталі (рис. 5).

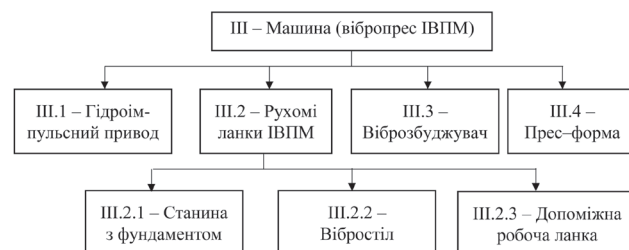


Рис. 5. Структурна схема системи III – машина (вібропрес ІВПМ)

Для завершення поданого у вигляді блок-схеми системного опису ІВПМ необхідно виявити в ньому структурні та функціональні зв'язки. При аналізі ІВПМ джерелом вхідної інформації служать відомості про оброблюваний об'єкт, які містяться в підсистемі I.1 та передаються в систему II у вигляді логічної функції вибору режиму ВУП. Режим, у свою чергу, визначає робочий процес, з урахуванням параметрів якого проводиться вибір машини конкретного типу (система III).

Функціональний зв'язок між машиною та об'єктом у вигляді функції силового впливу визначається для заданого проміжку часу. Це дозволяє отримати вихідну інформацію, яка так само, як і вхідна, пов'язана з об'єктом обробки. Але вона міститься в підсистемі I.2, що відповідає заготовці виробу. Функціональний зв'язок між підсистемою III.3 та ланкою III.2.2 має вигляд функції генерування тиску в порожнині робочого циліндра, що періодично змінюється в часі.

Використовуючи системний підхід при подальшому аналізі проектного вібропресового обладнання, можна виділити і внутрисистемні функціональні зв'язки. Функціональні зв'язки складових систем I та II вібропресового обладнання в аналітичній формі являє собою математичну модель робочого процесу ВУП.

Розробивши математичну модель для ІВПМ [14, 15] і оцінивши роботу його складових, ми переходимо до узагальненої моделі всього комплексу на основі вхідних та вихідних параметрів.

Задача прийняття рішення щодо оцінювання ефективності функціонування всього технологічного комплексу полягає у виборі адекватного рішення N з множини рішень:

$$Z_j \quad (j = \overline{1, J}).$$

Пропонується вибір здійснювати за допомогою оцінок ефективності функціонування технологічного комплексу на основі множини X оцінювальних параметрів:

$$x_i \quad (i = \overline{1, n}, n \in N).$$

Особливість математичної моделі полягає у тому, що вона враховує множину початкових вхідних параметрів:

$$K = (k_c) \quad (c = \overline{1, C}).$$

Множину оцінювальних параметрів системи:

$$X = (x_i) \quad (i = \overline{1, n}).$$

Функцію перетворення початкових параметрів на оцінювальні:

$$F_i: K \rightarrow X.$$

Множину декомпозиційних функцій згортання параметрів, за якими здійснюється ідентифікація стану системи:

$$D = (Y, \dots, S, P).$$

Для отримання результату щодо оцінювання ефективності функціонування процесу формування при прийнятті рішення, виходячи з початкових вхідних оцінювальних параметрів K , необхідно реалізувати вище вказані функції в такій послідовності:

$$K \xrightarrow{F_i} X \xrightarrow{D} Z_j.$$

Для визначення остаточної оцінки стану технологічного комплексу Z_j запропоновано враховувати комбінацію складних функцій – параметрів $P_1 \dots P_q$ – стану, що оцінюють групи показників вищого рівня ієрархії [16, 17]:

$$Z_j = F(P_1, P_q). \quad (1)$$

У свою чергу, вхідними даними для обчислення складних параметрів P_1 та P_q є сукупність параметрів, що оцінюють певні групи показників ($S_1 \dots S_p$), тобто:

$$P_1 = F(S_1 \dots S_t), P_q = F(S_e \dots S_p), \quad (2)$$

де $t, e, p \in M$, а M – множина функціоналів узагальнюючих параметрів P -го рівня.

Складні параметри передостаннього рівня ($Y_1 \dots Y_m$) є функціями від відповідних оцінювальних параметрів x_i стану:

$$Y_1 = f(x_1 \dots x_l) \dots Y_m = f(x_k \dots x_n), \quad (3)$$

де $l, k, n \in N$, а N – множина вихідних параметрів.

При цьому оцінювальні параметри x_i визначаються на базі множини початкових вхідних параметрів K і функції перетворення

$$F_i: X = F_i(K), K = (k_c), c = \overline{1, C}; X = (x_i), i = \overline{1, n}.$$

Виходячи зі складених функцій (1)–(3), необхідно сформулювати множину X відповідних параметрів для оцінювання ефективності функціонування всього технологічного процесу. Ця множина формується за допомогою множини початкових вхідних K параметрів ($k_1 \dots k_e$), де $e \in N$.

Запропоновано таку загальну структурну модель (рис. 6) оцінювання ефективності функціонування процесу фор-

мування заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом [12].

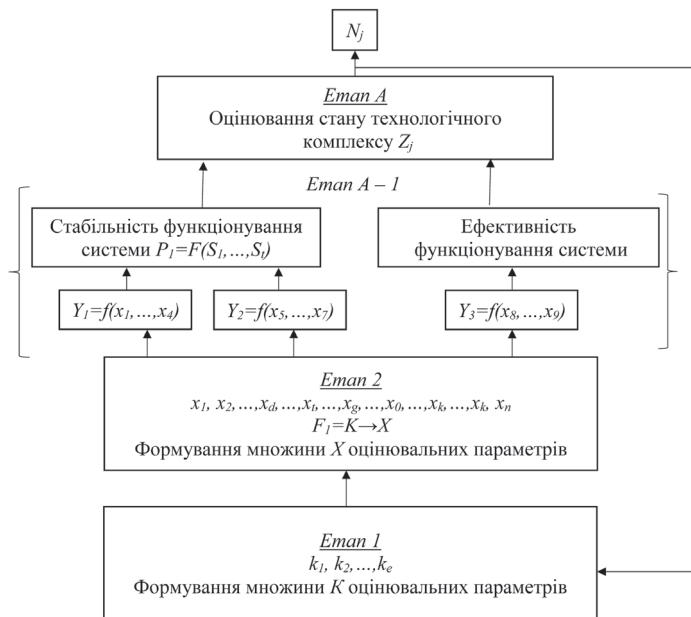


Рис. 6. Загальна структурна модель процесу оцінювання ефективності процесу формування заготовок на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом

На першому етапі здійснюється формування множини K початкових вхідних параметрів всього технологічного комплексу. Другий етап передбачає формування множини X оцінювальних параметрів стану кожної системи на базі множини K початкових вхідних параметрів [12]. На третьому і наступних проміжних етапах, зокрема S і P , відбувається формування складних узагальнених показників оцінювання ефективності функціонування кожної системи $Y_1 \dots Y_m$; $S_1 \dots S_p$; $P_1 \dots P_q$. На найвищому етапі A ідентифікується рішення:

$$Z_j, j = \overline{1, J},$$

яке визначає ефективність функціонування всього технологічного комплексу.

Для визначення функцій (1)–(3) необхідно сформулювати множини вхідних та вихідних параметрів. Ці множини повинні охоплювати широкий спектр параметрів впливу, а також задовольняти умови повноти, дієвості та мінімальності.

Об'єкт обробки (порошковий матеріал) входить до нашого технологічного комплексу, якого ми позначили системою I . Система I показує, що ряд з них (з індексом «і») в процесі ВУП змінюється від значень, що характеризують початковий стан заготовки ($i=0$) в підсистемі $I.1$, до значень, що характеризують її кінцевий стан ($i=k$) в підсистемі $I.2$ (рис. 3).

Основні параметри системи I , що формують множину вхідних і вихідних значень:

- ρ – середня щільність заготовки, кг/м³;
- a – лінійний середньостатистичний розмір частинок матеріалу, м;
- R_0 – геометричний фактор для початкового стану заготовки, м;

- $S_{\text{заг}}$ – площа відкритої поверхні з боку пуансона, м^2 ;
- $h_{\text{зі}}$ – висота заготовки, м ;
- $K_{\text{зі}}$ – динамічний модуль умовної пружності, МПа .

Тоді скорочену множину параметрів системи I запишемо у вигляді $\{\rho, a, R_0, S_{\text{заг}}, h_{\text{зі}}, K_{\text{зі}}\}$.

Режим віброударного пресування, в даному дослідженні, є система II (робочий режим), яка характеризує спосіб і режим силового впливу системи III на систему I. Виділимо основні параметри системи II. До даних параметрів системи II, відносяться:

- τ_0 – тривалість ударного імпульсу, с ;
- $P_{\text{ст}}$ – зусилля додаткового статичного навантаження заготовки, Н ;
- $F_{\text{з.макс}}$ – максимальне зусилля навантаження заготовки в процесі ВУП заготовки, Н ;
- n – загальне число ходів робочого столу ІВПМ;
- f_p – частоту їх здійснення, Гц .

Причому параметри n та f_p можна об'єднати і описати одним параметром, що характеризує повний час робочого процесу

$$t_{\text{вуп}} = n \cdot f_p^{-1}.$$

Множину основних параметрів системи II можна подати у вигляді $\{F_{\text{з.макс}}, P_{\text{ст}}, f_p, t_{\text{вуп}}\}$.

Так як ІВПМ є системою технологічного комплексу, то на основі аналізу структурної системи III (рис. 7) виділили параметри, що характеризується основними параметрами ГПІ:

- E_a – енергія одноциклового гідроаккумулятора, Дж ;
- W_a – об'єм гідросистеми, м^3 ;
- $K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт пружності, Па ;
- $Q_{\text{п1}}$ – подача робочої рідини від насоса, $\text{м}^3/\text{с}$.

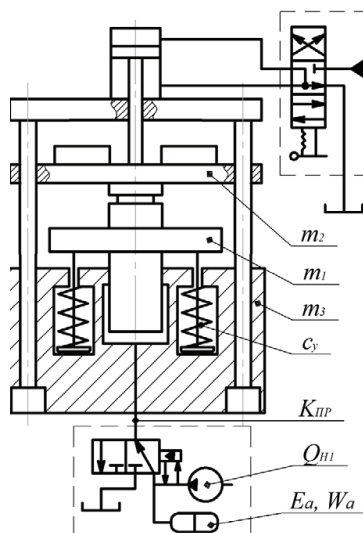


Рис. 7. Структурна схема ІВПМ

А також параметрами вібробудувача та системи рухомих ланок:

- p_1, p_2 – тиск спрацювання вібробудувача, Па ;
- m_1, m_2, m_3 – маса рухомих ланок, кг ;
- c_y – жорсткість пружних елементів, Н/м).

Так як

$$m_2/m_1 = \alpha \quad (m_2 = \alpha \cdot m_1),$$

тоді для системи III скорочена множина основних параметрів

$$\{E_a, m_1, \alpha m_1, c_y, p_1, K_{\text{пр}}\}.$$

Отже, множина оцінювальних параметрів X забезпечує формування таких складних параметрів які оцінюють систему I: (заготовка) – (Y_1), систему II (робочий режим) – (Y_2), систему III (машина) – (Y_3).

Параметр

$$Y_1 = f(x_1 \dots x_4)$$

характеризується оцінювальними параметрами: x_1 – середня щільність заготовки (ρ , кг/м^3); x_2 – розмір частинки матеріалу (a , м); x_3 – геометричний фактор для початкового стану заготовки (R_0 , м), x_4 – площа відкритої поверхні з боку пуансона ($S_{\text{заг}}$, м^2).

Параметр

$$Y_2 = f(x_5 \dots x_7)$$

характеризується оцінювальними параметрами:

- x_5 – питоме статичне зусилля ($P_{\text{ст}}$, Н);
- x_6 – тривалість ударного імпульсу (τ_0 , с);
- x_7 – повний час робочого ходу ($t_{\text{вуп}}$, с).

Параметр

$$Y_3 = f(x_8 \dots x_9)$$

характеризується оцінювальними параметрами: x_8 – енергія одноциклового гідроаккумулятора (E_a , Дж), x_9 – сумарна маса ($m_{\text{заг}} = m_1 + m_2 + m_3$, кг).

Середня щільність заготовки являє собою функцію $x_1 = f(k_1 \dots k_5)$ і визначається за допомогою параметрів:

- $k_1 = m_{\text{заг}}$ – маса навішування порошкового матеріалу;
- $k_2 = S_{\text{заг}} \cdot h_{\text{зі}}$ – об'єм заготовки після завершення її формоутворення;

– $k_3 = a$ – середньостатистичний розмір частинки матеріалу;

– $k_4 = R_0$ – геометричний фактор для початкового стану заготовки;

– $k_5 = S_{\text{заг}}$ – площа відкритої поверхні з боку пуансона.

Питоме статичне зусилля являє собою функцію $x_5 = f(k_6 \dots k_8)$ і визначається за допомогою параметрів: $k_6 = m$ – маса, $k_7 = g$ – прискорення вільного падіння, $k_8 = S_a$ – площа відкритої поверхні.

Тривалість ударного імпульсу, що являє собою функцію $x_6 = f(k_9 \dots k_{13})$ і визначається сукупністю параметрів:

– $k_9 = h_{\text{зо}}$ – висота заготовки у початковий момент ВУП;

– $k_{10} = h_{\text{зк}}$ – висота заготовки у кінцевий момент ВУП;

– $k_{11} = H_{\text{зо}}$ – модуль умовної пружності у початковий момент ВУП;

– $k_{12} = H_{\text{зк}}$ – модуль умовної пружності у кінцевий момент ВУП;

– $k_{13} = \rho_0$ – середня щільність заготовки у початковий момент ВУП;

– $k_{14} = \rho_k$ – середня щільність заготовки у кінцевий момент ВУП.

Повний час робочого ходу $x_7 = f(k_{15}, k_{16})$ і визначається за допомогою параметрів: $k_{15} = n$ – загальне число ходів робочого столу, $k_{16} = f$ – частота.

Енергія, що являє собою функцію $x_8 = f(k_{17}, \dots, k_{19})$ і визначається за допомогою параметрів: $k_{17} = p$ – тиск; $k_{18} = W_0$ – об'єм гідросистеми, $k_{19} = K_{\text{пр}}$ – коефіцієнт пружності.

Інерційна маса являє собою функцію $x_9 = f(k_{20})$ і визначається за допомогою параметра: $k_{20} = m_{\text{заг}}$ – загальна маса.

На основі цих вхідних параметрів формується множина X кількісних параметрів всього процесу (табл. 1).

Таким чином, визначено множину оцінювальних параметрів x_i $i = \overline{1,9}$, а саме: x_1, \dots, x_9 – значення яких обчислюються на базі вхідних початкових параметрів $k_1 \dots k_{20}$.

Таблиця 1

Множина параметрів технологічного комплексу

Назва показника	Позначення показника	Вхідні параметри
Система I (заготовка)	Y_1	$Y_1 = f(x_1 \dots x_4)$
Середня щільність заготовки, $\text{кг}/\text{м}^3$	x_1	k_1/k_2
Лінійний середньостатистичний розмір частинок матеріалу, м	x_2	k_3
Геометричний фактор початкового стану заготовки	x_3	k_4
Площа відкритої поверхні, м^2	x_4	k_5
Система II (робочий режим)	Y_2	$Y_2 = f(x_5 \dots x_7)$
Питоме статичне зусилля, МПа	x_5	$k_6 \cdot k_7/k_5$
Тривалість ударного імпульсу, с	x_6	$\frac{2k_7 \cdot k_8}{k_8 \cdot \sqrt{\frac{k_{10}}{k_{12}} - k_8} \cdot \sqrt{\frac{k_{11}}{k_{13}}}}$
Повний час робочого ходу, с	x_7	$k_{14} \cdot k_{15}$
Система III (машина)	Y_3	$Y_3 = f(x_8 \dots x_9)$
Енергія одноциклового гідроаккумулятора, Дж	x_8	$k_{16} \cdot k_{17}/2k_{18}$
Інерційна маса, кг	x_9	k_{19}

Визначаємо множину вихідних параметрів $Z = (Z_1, \dots, Z_j)$ за критеріями повноти та дієвості, що в повній мірі дозволяє задовольнити потреби споживачів цієї системи [12, 18]. Розглянемо кожне з

$$Z_j \ (j = \overline{1,3})$$

рішень: Z_1 – відмінний; Z_2 – нормальний; Z_3 – задовільний; Z_4 – критичний; Z_5 – незадовільний.

Для побудови методу оцінювання стану технологічного комплексу на основі нечітких визначимо множину T оцінювальних лінгвістичних термів, що являє собою сукупність значень лінгвістичних змінних. Лінгвістична змінна – змінна, яка приймає значення з множини слів або словосполучень будь-якої мови [19]. В нашому випадку лінгвістична змінна це – ефективність технологічного комплексу (заготовка – робочий процес – машина). Для багатьох задач, що розв'язуються в межах людиномашинних систем, точність отриманого розв'язку щодо рівня працездатного стану системи дозволяє ідентифікувати достатність:

– трьох – N (низький), C (середній), B (високий) ($T = 3$);

– п'яти лінгвістичних термів – N (низький), HC (нижче середнього), C (середній), BC (вище середнього), B (високий) ($T = 5$).

Саме така кількість T дозволяє оптимізувати (як за критерієм часу, так і за складністю) роботу експертів. Далі задамо поліномні функції належності μ^{Z_j} , $j = \overline{1,J}$ значень параметрів (x_1, \dots, x_9) лінгвістичним термам.

$$\mu^H(x) = \begin{cases} 1, & x \in [a, a_1]; \\ \left(\frac{k_1 - x}{k_1 - a_1} \right)^{0.8}, & x \in [a_1, k_1]. \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu^{HC}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x - a}{b - a} \right)^{1.2}, & x \in [a, b]; \\ 1, & x \in (b, b_1); \\ \left(\frac{k_1 - x}{k_1 - b_1} \right)^{0.8}, & x \in [b_1, k_1]. \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu^C(x) = \begin{cases} \left(\frac{x - a}{c - a} \right)^{1.2}, & x \in [a, c]; \\ 1, & x \in (c, c_1); \\ \left(\frac{k_1 - x}{k_1 - c_1} \right)^{0.8}, & x \in [c_1, k_1]. \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu^{BC}(x) = \begin{cases} \left(\frac{x - a}{d - a} \right)^{1.2}, & x \in [a, d]; \\ 1, & x \in (d, d_1); \\ \left(\frac{k_1 - x}{k_1 - d_1} \right)^{0.8}, & x \in [d_1, k_1]. \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu^B(x) = \begin{cases} \left(\frac{x - a}{k - a} \right)^{1.2}, & x \in [a, k]; \\ 1, & x \in (k, k_1]. \end{cases} \quad (8)$$

де $a, a_1, b, b_1, c, c_1, d, d_1, k, k_1$ – значення характеристичних точок, які визначаються власним баченням залучених експертів.

Агреговане значення параметрів a, \dots, k_1 для кожного з показників визначаємо за формулою:

$$AZ = \sum_{s=1}^d k_{ns} \cdot Z_s, \quad (9)$$

де k_{ns} – компетентність s -го експерта; Z_s – значення параметра, надане s -м експертом.

Розрахуємо агреговані значення AZ параметрів $(a \dots k_1)$ для показника x_1 (середня щільність заготовки від 2,1 до 2,9 $\text{г}/\text{см}^3$).

Параметр a : $AZ = 2,1$; параметр a_1 : $AZ = 2,3$; параметр c : $AZ = 2,5$; параметр c_1 : $AZ = 2,7$; параметр k : $AZ = 2,8$; параметр k_1 : $AZ = 2,9$.

Аналогічним чином визначаємо агреговані значення цих параметрів для усіх інших показників.

Для отримання більш точної оцінки ефективності процесу формування заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом піднесено поліномні функції належності $\mu(x_i)$ до степеню α_i .

Тоді значення функцій належності, набувають вигляду:

$$\mu^{Z_j}(x_i) = \mu^{Z_j}(x_i)^{\alpha_j}, \quad j = \overline{1,J} (J = 5), \quad i = \overline{1,n} (n = 16). \quad (10)$$

Остаточним результатом є найбільше зі значень функцій належності μ^{Z_j} , тобто:

$$\mu^{Z_j} = \max \{ \mu^{Z_1}, \mu^{Z_2}, \mu^{Z_3}, \mu^{Z_4}, \mu^{Z_5} \}. \quad (11)$$

Екстремальне значення поліномних функцій належності (11) для множини вихідних параметрів $Z = (Z_1, \dots, Z_j)$ характеризує оптимальність груп Y_1, \dots, Y_3 параметрів ефективності функціонування технологічного комплексу за критеріями повноти та дієвості.

5. Результати досліджень параметрів технологічного процесу формотворення заготовок з порошкових матеріалів

Для отримання залежностей характеристик досліджуваного технологічного процесу головним критерієм для оцінювання методу формотворення обираємо якість заготовки. Саме якість заготовки виробу повинна забезпечуватись відповідними параметрами: середньою щільністю і нерівнощільністю заготовки по об'єму в умовах безвідходного виробництва, усуваючи подальшу механічну обробку.

Для теоретичного дослідження технологічного процесу формування були обрані чотири зразки порошкових матеріалів [12]:

- М1 – мінеральний порошок НЕФ (вологість 13 %, зв'язка жирова 3,2 %);
- М2 – мінеральний порошок НЕФ (вологість 2 %, зв'язка відсутня);
- М3 – карбід кремнію зел. № 4, 10, 12, М28 – 80 % (бакеліт 10 %, кокс 10 %);
- М4 – вогнетривкий шамот (вологість 13,8 %, зв'язка глиняна 31,2 %).

Тому на основі вищевказаних розроблених моделях нечітких множин був розроблений алгоритм [20, 21] по визначенню середньої щільності заготовки для трьох видів режимів обробки ВУП (рис. 8), який залежить від зміни енергії одноциклового гідроаккумулятора E_a , а також від частоти вібрацій заготовки f .

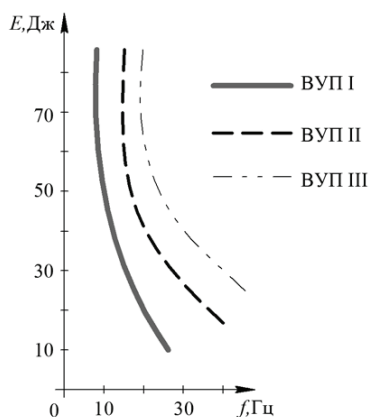


Рис. 8. Графік типів режиму обробки ВУП заготовок з порошкових матеріалів

Даний алгоритм був реалізований на ЕОМ, результати розрахунку якого представлені на рис. 9. Результатом розрахунку ми отримали графіки (рис. 9) залежності зміни середньої щільності заготовки в залежності від:

- статичного навантаження заготовки – P , МПа;
- частоти вібрацій заготовки – f , Гц;
- енергії одноциклового гідроаккумулятора E_a , Дж;
- нерівнощільності заготовки – ϵ_p , %.

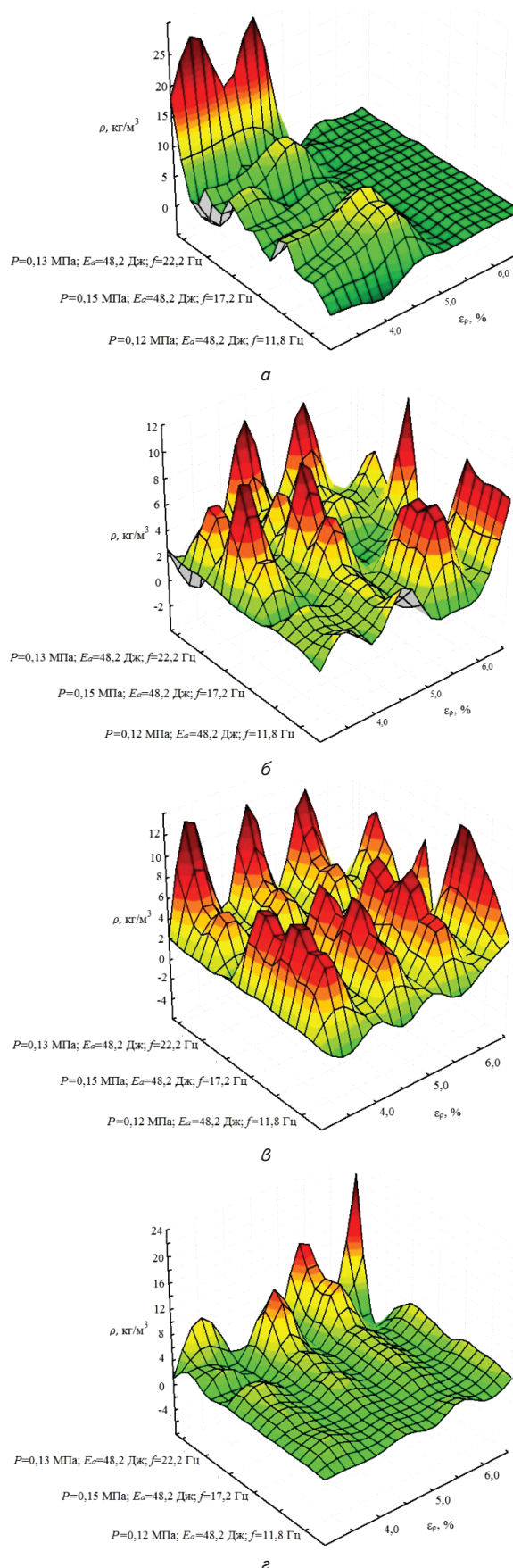


Рис. 9. Графік зміни середньої щільності отриманої заготовки з оброблювальних матеріалів в залежності від зміни технологічних параметрів ВУП: а – матеріал М1; б – матеріал М2; в – матеріал М3; г – матеріал М4

Графічна інтерпретація (рис. 9) методом нечітких множин в середовищі MAPLE 10.0 отримала наступні оціночні значення вхідних параметрів:

$$- M1 - \mu_{M1}^{Z_1} = \max \mu^{Z_{1..5}}(x_1, \dots, x_9) = 0,836;$$

$$- M2 - \mu_{M2}^{Z_2} = \max \mu^{Z_{1..5}}(x_1, \dots, x_9) = 0,842;$$

$$- M3 - \mu_{M3}^{Z_3} = \max \mu^{Z_{1..5}}(x_1, \dots, x_9) = 0,901;$$

$$- M4 - \mu_{M4}^{Z_4} = \max \mu^{Z_{1..5}}(x_1, \dots, x_9) = 0,768.$$

На основі екстремальних значень поліномних функцій належності для кожного типу порошкового матеріалу було визначено найефективніші режими віброударного пресування, а саме для M1 і M2 – ВУП-1, для M3 – ВУП-III і M4 – ВУП-II.

6. Обговорення результатів дослідження технологічних параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів

Для теоретичного дослідження ефективності технологічного процесу формоутворення заготовок було використано метод нечітких множин [11, 12–20]. Значення функцій належності

$$\mu^{Z_j} = \max \{ \mu^{Z_1}, \mu^{Z_2}, \mu^{Z_3}, \mu^{Z_4}, \mu^{Z_5} \},$$

для множини вихідних параметрів

$$Z = (Z_1, \dots, Z_5),$$

за критеріями повноти та дієвості визначили концентрацію мінімальних значень для середньої щільності та нерівнощільності вихідних заготовок з досліджуваних матеріалів. Для матеріалу з мінеральних порошоків M1 сукупність оптимальних технологічних показників знаходяться в режимі ВУП-1 становлять для середньої щільності матеріалу $\rho = 2,3 \text{ кг/м}^3$ для нерівнощільності $\epsilon_p = 6,5 \%$. Оцінювання оброблюваного матеріалу з мінеральних порошоків M2 дещо відокремлюється в порівнянні з отриманими даними в математичній моделі, а саме відображає доцільність застосування комбінації технологічних режимів ВУП-I, ВУП-II, при яких якісні характеристик набувають значень: у випадку аналізу середньої щільності її мінімальне значення $\rho = 1,9 \text{ кг/м}^3$ спостерігається при ВУП-2, у випадку аналізу нерівнощільності мінімальне значення $\epsilon_p = 2,3 \%$ – ВУП-I. Дослідження вихідних зразків сформованих з M3 засвідчило, що оптимальні значення середньої щільності матеріалу $\rho = 4,7 \text{ кг/м}^3$ та нерівнощільності $\epsilon_p = 3,9 \%$ спостерігаються при III режимі віброударного пресування. У випадку з оцінюванням якісних характеристик спресованих матеріалів з вогнетривкого шамоту M4 слід відзначити, що мінімальні значення середньої щільності та нерівнощільності, відповідно, $\rho = 3,8\text{--}4,2 \text{ кг/м}^3$ та $\epsilon_p = 2,5\text{--}2,9 \%$ спостерігаються при ВУП-I та ВУП-II.

Аналіз матриці знань для оцінювання груп параметрів (Y_1, \dots, Y_3) якісних характеристик досліджуваних матеріалів засвідчив, що оптимальними технологічними параметрами обробки матеріалів M1, M2 є тиск $P = 0,12 \text{ МПа}$, M3 – $P = 0,15 \text{ МПа}$, M4 – $P = 0,13 \text{ МПа}$. Проте слід відзначити зростання досліджуваних показників середньої щільності та нерівнощільності оброблюваного матеріалу при збільшенні енергетичних

характеристик обробки та зменшення частоти технологічного впливу.

Також значення якісних параметрів матеріалу M1 (щільності та нерівнощільності оброблюваного матеріалу) за умови режиму роботи $P = 0,12 \text{ МПа}$; $E_a = 85,8 \text{ Дж}$; $f = 8,2 \text{ Гц}$ супроводжується значними енерговитратами за умови зниження якісних характеристик.

Змінюючи величину енергії E_a у межах конкретного режиму ВУП можна забезпечити зменшення або збільшення середньої щільності зразка з будь-якого вказаного порошкового матеріалу, до його недопресовування або перепресовування [1, 3, 12]. Для постійної величини енергії E_a збільшення тривалості процесу ВУП дозволяє збільшувати середню щільність заготовок тільки до визначеної межі. Подальше збільшення середньої щільності зразка практично залишається незмінним, а якість помітно знижується в результаті перепресовування та руйнування.

7. Висновки

1. Проаналізовано процес формоутворення заготовок з порошкових матеріалів і визначено збільшення середньої щільності заготовок на 60–70 %, відносно статичного пресування, вібраційним і віброударним способом обробки на основі розробленої структури вібропресових формувальних машин, типів приводів та їх характеристик.

2. На основі системного підходу і складених множин конструктивних параметрів технологічного обладнання розроблена математична модель визначення середньої щільності заготовки. Показано, що вона представляє собою множину початкових вхідних конструктивних і оцінювальних технологічних параметрів (заготовка, робочий процес, машина) і функцій перетворення початкових параметрів на оцінювальні функції. На основі множин оцінювального параметру отримані поліномні функції належності для оцінки характеристик функцій віброударного режиму навантаження процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів.

3. За допомогою екстремуму масиву значень функцій належності, як критерію повноти та дієвості, для множин середньої щільності заготовки із чотирьох зразків порошкових матеріалів було обрано ефективні режими віброударного навантаження. Для типів заготовок:

– мінерального порошку НЕФ (вологістю 13 %, зв'язка жирова 3,2 %), і мінеральний порошок НЕФ (вологістю 2 %, зв'язка відсутня) – віброударний режим типу I (середня енергія гідроаккумулятора $E_a = 55,3 \text{ Дж}$, частота вібрацій заготовки – $f = 11,2 \text{ Гц}$);

– карбід кремнію зел. № 4, 10, 12, M28 – 80 % (бакеліт 10 %, кокс 10 %) – віброударний режим типу I (середня енергія гідроаккумулятора $E_a = 55,3 \text{ Дж}$, частота вібрацій заготовки – $f = 11,2 \text{ Гц}$) і типу II (середня енергія гідроаккумулятора $E_a = 62,8 \text{ Дж}$, частота вібрацій заготовки – $f = 17,28 \text{ Гц}$);

– вогнетривкий шамот (вологість 13,8 %, зв'язка глиняна 31,2 %) – віброударний режим типу I (середня енергія гідроаккумулятора $E_a = 55,3 \text{ Дж}$, частота вібрацій заготовки – $f = 11,2 \text{ Гц}$) і типу III (середня енергія гідроаккумулятора $E_a = 62,8 \text{ Дж}$, частота вібрацій заготовки – $f = 17,28 \text{ Гц}$).

Література

1. Іскович-Лотоцький, Р. Д. Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування [Текст]: монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 338 с.
2. Іскович-Лотоцький, Р. Д. Вібраційні та віброударні пристрої для розвантаження транспортних засобів [Текст]: монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. – 156 с.
3. Вірник, М. М. Вібраційні та віброударні процеси і машини у ливарному виробництві [Текст]: монографія / М. М. Вірник, Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. – 198 с.
4. Еремеева, Ж. В. Особенности применения наноразмерных порошков углерода и хрома на процессы подготовки шихты и прессования порошковых сталей [Текст] / Ж. В. Еремеева, Н. М. Ниткин, Г. П. Шарипзянова // Известия московского государственного технического университета МАМИ. – 2011. – № 2 (12). – С. 123–127.
5. Анциферов, В. Н. Формование порошковых материалов в центрифуге [Текст] / В. Н. Анциферов, В. Е. Перельман // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 5–7.
6. Севостьянов, И. В. Установка для виброударного обезвреживания отходов пищевых производств в пресс-форме [Текст] / И. В. Севостьянов, А. В. Слабкий, А. В. Полищук, А. И. Ольшевский // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – Т. 4, № 4 (24). – С. 41–46. doi: 10.15587/2312-8372.2015.47694
7. Саруев, Л. А. Разработка и исследование гидромеханической системы формирования силовых импульсов в ставе штанг для интенсификации вращательного бурения [Текст] / Л. А. Саруев, А. А. Казанцев // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313, № 1. – С. 75–78.
8. Tymchuk, S. Assess electricity quality by means of fuzzy generalized index [Text] / S. Tymchuk, O. Miroshnyk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 3, Issue 4 (75). – P. 26–31. doi: 10.15587/1729-4061.2015.42484
9. Yan, H. Adaptive neuro fuzzy inference system for classification of water quality status [Text] / H. Yan, Z. Zou, H. Wang // Journal of Environmental Sciences. – 2010. – Vol. 22, Issue 12. – P. 1891–1896. doi: 10.1016/S1001-0742(09)60335-1
10. Маслобоев, А. В. Метод и технология комплексной оценки эффективности инноваций на начальных этапах жизненного цикла на основе математического аппарата теории нечетких множеств [Текст] / А. В. Маслобоев, В. В. Максимова // Труды Кольского научного центра РАН. – 2010. – № 3. – С. 50–66.
11. Wicher, P. Measuring the metallurgical supply chain resilience using fuzzy analytic network process [Text] / P. Wicher, F. Zapletal, R. Lenort, D. Stas // Metalurgija. – 2016. – Vol. 55, Issue 4. – P. 783–786.
12. Іскович-Лотоцький, Р. Д. Управління ефективністю та надійністю технологічних процесів в гнучких інтегрованих виробничих системах [Текст] / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська // Вісник НТУУ «Київський технічний інститут машинобудування». – 2009. – С. 266–270.
13. Пат. № 31169 UA. Формувальна машина. МПК В 22 С 15/00 [Текст] / Вірник М. М., Іскович-Лотоцький Р. Д., Добрянюк Ю. В. – № u200714153; заявл. 17.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6. – 3 с.
14. Іскович-Лотоцький, Р. Д. Математичне моделювання робочих процесів інерційного вібропрес-молота з електрогідравлічною системою керування гідроімпульсного привода для формування заготовок з порошкових матеріалів [Текст] / Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. П. Міськов, Я. В. Іванчук // Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки. – 2016. – № 3 (237). – С. 176–180.
15. Іскович-Лотоцький, Р. Д. Моделювання робочих процесів в піролізній установці для утилізації відходів [Текст] / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2016. – Т. 1, № 8 (79). – С. 11–20. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59419
16. Tan, M. Hybrid system based fuzzy-pid control schemes for unpredictable process [Text] / M. Tan, C. Loh, K. Teo // IJCTACT Journal on Soft Computing. – 2011. – Vol. 2, Issue 1. – P. 211–217. doi: 10.21917/ijsc.2011.0033
17. Guediri, A. Application of Fuzzy Ensembles for Optimal Distribution of Power in Electrical Networks [Text] / A. Guediri, D. B. Attous // Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 3, Issue 1. – P. 1. doi: 10.4314/jfas.v3i1.1
18. Ротштейн, О. П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі [Текст] / О. П. Ротштейн. – Вінниця: УНІВЕРСУМ, 1999. – 320 с.
19. Silva, V. M. Sensitivity analysis of ordinary kriging to sampling and positional errors and applications in quality control [Text] / V. M. Silva, J. F. C. L. Costa // REM – International Engineering Journal. – 2016. – Vol. 69, Issue 4. – P. 491–496. doi: 10.1590/0370-44672015690159
20. Азарова, А. О. Математичні моделі та методи оцінювання фінансового стану підприємства [Текст] / А. О. Азарова, О. В. Рузакова. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 172 с.
21. Kobayashi, S. Metal forming and the finite element method [Text] / S. Kobayashi, S.-I. Oh, T. Altan. – New York: Oxford University Press, 1989. – 377 p.